



RU9604448

**A set of tests, neutron physical calculation code SAPFIR\_VVR-RC  
verification and validation experience for various types of reactors**

V.G.Artemov, A.V.Elchine, A.S.Ivanov, A.S.Karpov, V.V.Obuchov,  
A.V.Piskarev, Yu.P.Shemaev, Science and Research Institute of Technology,  
Sosnovy Bor, Russia.

**Система тестов и опыт верификации комплекса программ нейтронно-  
физического расчета САПФИР\_VVR-RC для различных типов реакторов**

В.Г. Артемов, А.С. Иванов, А.В. Ельшин, А.С. Карпов, А.В. Пискарев, В.В.  
Обухов, Ю.П. Шемаев, Научно-исследовательский технологический институт,  
г. Сосновый Бор, Россия.

Approach to testing and validation of neutron physical reactor calculation codes is described. It is obtained from verification and pre-qualification experience with SAPFIR\_VVR-RC code. Sistemization and classification of experimental and calculational tests used for various types of water - water reactor calculation codes verification and validation have been carried out. Experimental and calculational test tasks solution results are presented for neutron physical calculation SAPFIR\_VVR-RC code accuracy illustration.

Процедура тестирования и верификации - достаточно длительный процесс, начинающийся на стадии разработки и продолжающийся в течении всей жизни программных средств (ПС). Этот процесс в определенной мере субъективный, поскольку в настоящее время еще не до конца устоялись требования к процедуре верификации ПС для расчета нейтронно-физических характеристик реакторов и поэтому настоящая работа отражает опыт верификации конкретного ПС.

Комплекс программ САПФИР ВVR-RC основывается на современных методиках и алгоритмах с детальным описанием нейтронно-физических процессов на основе фундаментальных ядерных данных. Можно определить диапазон применения этой программы от "больших" тепловых водо-водяных реакторов АЭС до кипящих водо-водяных, существенно гетерогенных реакторов, с промежуточным спектром.

С точки зрения задачи верификации необходимо отметить, что он "собран" на базе пакета прикладных программ САПФИР [1], представляющего собой систему программных модулей и библиотек нейтронных сечений для нейтронно-физического расчета ядерных реакторов повышенной точности.

Это даст возможность:

- при формировании рабочей библиотеки нейтронных сечений использовать как отечественные (Банк Данных ИАЭ-87), так и зарубежные (типа ENDF/B) библиотеки ядерных данных;

- генерировать на базе ППП САПФИР серию реперных программ:

а) решение уравнения замедления с детальным представлением сечений замедления в области разрешенных резонансов;

б) решение уравнения переноса нейтронов в ячейке и реакторе методом Монте-Карло и методом дискретных ординат ;

в) решение задачи диффузии нейтронов в реакторе в многогрупповом (до 26 групп) диффузионном приближении с учащением конечно-разностной сетки (до 24 точек на ТВС).

При проведении верификации и подготовки программ к аттестации мы руководствовались рекомендациями Совета по аттестации ПС при НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России. Система тестов выбиралась так, чтобы обеспечить основные задачи верификации:

- проверку достоверности константного обеспечения;
- проверку адекватности математических моделей и вычислительных алгоритмов физической задаче;
- определение области применения реализованных в ПС моделей и алгоритмов;
- оценку точности расчета нейтронно-физических характеристик, важных для безопасности реакторов в области применимости ПС.

Для практики главной является последняя задача, но для ее обоснования необходимо решить первые три, поскольку итоговая погрешность расчета интегральных характеристик реактора включает несколько составляющих:

- неопределенность используемых ядерных данных;
- неточность моделей описания физических процессов при решении спектральной задачи (задача переноса нейтронов с учетом замедления, резонансного поглощения, термализации, реальной геометрии ячейки реактора);
- неточность моделей гомогенизации и диффузии нейтронов в целом по реактору;
- неточность моделей описания обратных связей, связанных с температурой, изменением изотопного состава при выгорании и отравлении реактора;
- неопределенность в исходных данных из-за технологических допусков.

С учетом этого, экспериментальные данные, используемые для верификации программ, были разделены по типам. Кроме этого на всех этапах верификации программ мы параллельно использовали численные тесты, в качестве которых использовались решения тестовых задач ("Calculational Benchmark"), полученные по известным программам реперного класса типа MCNP, MCU, а также численные тесты, подготовленные с использованием реперных алгоритмов ППП САПФИР, упомянутых выше.

В результате, при верификации комплекса САПФИР\_ВВР-РС сложился подход, основанный на последовательном использовании следующей системы тестов:

- 1) Численные и экспериментальные тесты типа "Nuclear Data Benchmark", предназначенные для обоснования используемых ядерных данных и моделей при решении спектральных задач;
- 2) Численные и экспериментальные тесты типа "Separate Effects Benchmark", предназначенные для обоснования конкретных нейтронно-физических моделей, учитывающих изменение изотопного состава, изменение температуры топлива и теплоносителя, влияние поглотителей и т.д.;
- 3) Численные и экспериментальные тесты на сборках комплектов ТВЭЛ, ТВС, близких по свойствам определенным типам реакторов ("Core physics Benchmark"). При подборе экспериментов и тестов этой группы мы старались максимально охватить диапазон изменения параметров ТВЭЛ, ПЭЛ, СВП, ТВС используемых в реакторах;
- 4) Результаты измерений нейтронно-физических характеристик на полномасштабных активных зонах в начале кампании (без мощности). В эту группу вошли эксперименты для разных типов реакторов при изменении состояния активных зон (эксперименты при достройке, разогреве активной зоны, при перекомпенсации и "сбросах" групп ОР и др.). Для верификации преимущественно использовались результаты прямых измерений:

критические значения концентрации борной кислоты и положений органов регулирования (ОР), результаты измерений дифференциальных и интегральных характеристик ОР, температурного коэффициента реактивности, распределения энерговыделения по активной зоне и по отдельным ТВС; —

5) Результаты измерений нейтронно-физических характеристик на полно-масштабных активных зонах действующих реакторов для верификации комплекса программ в целом с учетом моделирования работы на мощности, отравления, выгорания. В эту группу мы отнесли эксперименты при работе реакторов на мощности в различных режимах, а также результаты измерений на "нулевом" уровне мощности в различные моменты кампании.

В настоящее время комплекс программ САПФИР\_ВВР-РС в соответствии с Положением Госатомнадзора России готовится к аттестации в ЦЭП НТЦ ЯРБ. Проведенная на первом этапе экспертиза и аттестация программ нейтронно-физического расчета ячеек реакторов САПФИР\_ВВР, САПФИР\_ВВРТ подтвердила полученные в верификационном отчете оценки точности программ в широком диапазоне области применения:

- ТВЭ: стержневой (круглого, квадратного и др. профилей), кольцевой;
- Топливо: на основе урана, плутония (металлическое, керамическое, дисперсное);
- ТВС: типа кассета, технологический канал с разным типом ТВЭ;
- Элементы системы СУЗ типа: компенсирующая решетка, компенсирующая решетка с плитами, кластер, единичный стержень (АЗ,ОР);

- Поглощающие элементы КГ, ОР, СУЗ: стержневые, кольцевые;
- Материал ПЭЛ на основе бора, европия, кадмия, гафния, диспрозия;
- Выгорающие поглотители: стержневые, пластинчатые, элементы конструкций ТВС из борированных сталей;

- Материалы выгорающих поглотителей на основе бора, гадолиния, эрбия, гафния, диспрозия, поглотителя смешанного с топливом;

- Водо-урановые отношения, характеризующие относительные размеры элементов ячейки:

- Отношение концентраций ядер водорода и урана-235: 1.4 - 4;
- Плотность теплоносителя в канале: 50 - 500;
- Плотность теплоносителя в ячейке (в среднем по каналу и межканальному пространству): 0 - 1 г/см<sup>3</sup>;
- Плотность теплоносителя в ячейке (в среднем по каналу и межканальному пространству): 0.2 - 1 г/см<sup>3</sup>;
- Обогащение топлива: 1.5% - 90%;

На основе верификационных расчетов получены оценки точности обеспечиваемой в области допустимых значений параметров :

- $K_{эфф}$  для для однородных решеток ТВС различных типов: 0.7%
- $K_{эфф}$  для для решеток ТВС различных типов с "тяжелыми" поглотителями (стержни СВП, КГ): 1.3%
- $K_{эфф}$  для для решеток ТВС различных типов при обезвоживании канала: 1.3%
- $K_{эфф}$  для для решеток ТВС различных типов с учетом выгорания топлива и поглотителей: 1.5%
- потвельное энерговыделение в ТВС активной зоны: 5-7%

1. Тебин В.В., Обухов В.В, Сергеев В.К., Иванов А.С. Проект пакета программ САПФИР для решения задач расчета ячейки реактора. В сб. ВАНТ с. Физика и техника ядерных реакторов, вып. 4, Москва, 1985, с. 68-71.